

Article, Published Version

Jambor, Franz

Schutz der Sohle in Flüssen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103101>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jambor, Franz (1965): Schutz der Sohle in Flüssen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 22. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 51-64.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dr.-Ing. Franz Jambor

Schutz der Sohle in Flüssen

Die Nutzung der fließenden Wasserwelle durch den Menschen nimmt mit steigenden Zivilisations- und Kulturaufgaben rasch zu. Dabei ist es unvermeidlich, dass dem Fluß ein gewisser Zwang angetan wird, durch den das durch Jahrhunderte entstandene Gleichgewicht seiner Fließverhältnisse zur Widerstandskraft der Sohle aufgehoben oder zumindest beeinträchtigt wird. Meist wird durch Laufverkürzungen, Querschnittseinengungen, allmähliche Vorlandaufhöhungen, Eindeichungen und evtl. Veränderungen der fließenden Wasserwelle selbst eine ansehnliche Gefällevermehrung und damit eine Geschwindigkeitssteigerung im Fluß erhalten. Die Folge davon ist eine verstärkte Schleppspannung des Flusses und ein gesteigerter Angriff auf die unverändert gebliebene Flußsohle. In der gleichen Richtung wirkt der kulturbedingte, fortschreitende Geschiebeentzug durch intensivere Bodennutzung, die zu ihrer Ermöglichung und zu ihrem Schutz die Wildbachverbauung, Regulierung der Bäche und Flüsse und die evtl. Beherrschung des Abflusses durch Talsperren im oberen Einzugsgebiete zur Voraussetzung hat. In neuerer Zeit macht sich außerdem noch die stärkere Zunahme des Schiffsverkehrs mit der Erosionswirkung der Schiffsschrauben bemerkbar.

Die Auswirkung von all dem sind Eintiefungen des Flusses, teils auf örtlich beschränkte Länge, teils aber auch auf große zusammenhängende Flußabschnitte. Solange nicht Böschungen des Flusses, Bauwerke u.a. unmittelbar gefährdet sind, werden sie hingenommen in der oft auch berechtigten Erwartung, dass der Fluß sich selbst ein neues Gleichgewicht zwischen angreifender Schleppspannung und Widerstandsfähigkeit der Flußsohle schafft. Sind jedoch Bauwerke in Gefahr oder wird die Nutzung von Bauwerken (angeschlossene Häfen o.ä.) durch das Absinken der Sohle und damit der Wasserspiegelhöhen gefährdet, muß einer weiteren Sohleintiefung Einhalt geboten werden.

An baulichen Hilfsmitteln zur Sicherung der Sohle sind Sohl- oder Grundswellen und quer über den Fluß gerammte Spundwände bekannt, weiters für kleinere Verhältnisse die Sohlbefestigung durch Pflasterung, Platten, Matten, Sinkstücke u.ä. Sohlswellen und Spundwände haben den Vorteil, daß sie verhältnismässig großflächig angewendet werden können. Nur ist ihre Wirkung leider nicht voll befriedigend. Über ihnen bildet sich eine Gefällekonzentration im Wasserspiegel aus, so daß durch sie das allmähliche Fließgefälle in Stufen aufgelöst wird. Die Schifffahrt wird dadurch merklich behindert. Ausserdem wird die Flußsohle zwischen den einzelnen Grundswellen noch sehr stark erodiert, wodurch einmal der genannte hydraulische Nachteil noch mehr in Erscheinung tritt und weiters der Bestand der Schwellen selbst gefährdet werden kann. Es hat sich gezeigt, dass mit einem

längeren Bestand von Grundswellen nur dann gerechnet werden kann, wenn die Sohle gegenüber der Wasserströmung doch in gewissem Maße standfest ist. Bei leicht beweglichem Boden werden sie innerhalb kurzer Zeit hinter- oder unterspült und gehen ihrer Zerstörung entgegen. Ähnlich ist es mit einer Sohlensicherung durch einzelne Querspundwände. Solange die Sohle in Höhe des Spundwandkopfes erhalten bleibt, ist alles in Ordnung. Wird aber einmal die Sohle knapp unterhalb der Spundwand erodiert, so wächst durch Strömungsablösung dieser Kolk schnell und es bleibt eine Frage der Rammtiefe, ob die Spundwand bestehen bleibt. Das gleiche tritt ein bei einem Druckkolk knapp oberhalb der Spundwand. Diese Gefahren sind für eine Spundwand besonders groß, wenn eine große Strömungsgeschwindigkeit im Fluss herrscht. Damit ist die Anwendungsmöglichkeit dieser beiden Mittel aber nur sehr bedingt gegeben.

Eine Sohlenbefestigung durch Pflasterung, Platten, Matten, Sinkstücke u.ä. sind gern und erfolgreich angewandte Mittel zum Schutz einzelner Bauwerke in örtlicher Begrenzung. Zum Teil erfordern sie jedoch wie Pflasterung und Platten die Herstellung im Trockenen bzw. in trockener Baugrube, zum Teil seichtes, nicht zu stark strömendes Wasser zum Einbau, wie bei Matten. Nur Sinkstücke können auch unter verhältnismäßig schwierigen Bedingungen eingebracht werden. Matten haben sich in sehr vielen Fällen gut bewährt, wenn eine leicht bewegliche Sohle verhältnismäßig großflächig festgelegt werden muß. Es sei hier erinnert an die Sicherung von Brückenpfeilern oder Brückenjochen in noch wenig geregelten Flüssen mit feinsandiger Sohle, bei welchen durch ein Hochwasser der vorhandene Stromstrich mit unerwarteten Tiefen stark verlegt werden kann. Leider findet ihre Anwendung mit größerer Tiefe und größerer Strömungsgeschwindigkeit eine Grenze.

Soll die Erosion auf größerer Fläche, besonders auf größerer Länge verhindert oder wesentlich eingedämmt werden, muß nach anderen Hilfsmitteln Ausschau gehalten werden. Sie können in einer hydraulischen Verbesserung des Abflusses, insbesondere des Hochwasserabflusses bestehen, oder in der Erprobung und Ausführung neuer Bauweisen der Sohlensicherung. Es wurde eingangs ausgeführt, daß unsere Flüsse durch Eindeichung und laufende Vorländerhöhung infolge Ablagerungen gezwungen werden, einen immer größeren Anteil des Hochwasserabflusses im eigentlichen Flußbett abzuführen, womit der Angriff auf ihre Sohle und deren noch tieferes Eingraben die unvermeidlichen Folgeerscheinungen sind. Mit einer Korrektur der Eindeichungsbreite in besonders kritischen Abschnitten und insbesondere einer Abgrabung zu hoher Vorländer oder wenigstens nicht notwendiger Abflußhindernisse auf den Vorländern wird schon sehr viel erreicht und diese Maßnahmen werden auf ganz große Flußabschnitte auch die einzigen sein, die verwirklicht werden können, wenn nicht zum

radikalsten Hilfsmittel geschritten wird, zum Brechen des Gefälles durch Staustufen. In Flüssen mit sehr starkem und noch zunehmendem Schiffsverkehr wäre dies allerdings die Ultima ratio.

Entwicklung einer neuen Bauweise:

Die Entwicklung einer neuen Bauweise muß sehr stark von der Beobachtung der natürlichen Hilfsmittel eines Flusses und der natürlichen Vorgänge in ihm bei seiner allmählichen natürlichen Sohlensicherung ausgehen. Die Aufgabe wird darin bestehen, ihn hierbei zu unterstützen. Wird durch irgendwelche künstliche Maßnahmen die Fließgeschwindigkeit im Fluß erhöht, so wird seine Schleppspannung erhöht, d.h. er vermag größere Mengen von Geschiebe weiterzutragen als ihm von oben zugeführt werden. Er verschafft sich dieses Geschiebe aus seiner eigenen Sohle, beginnend mit dem feinkörnigen Anteil, dem ein immer gröberes Korn folgt. Die Korngröße, deren Fortbewegung über die Schleppspannung hinausgeht, bleibt liegen und sammelt sich an der Sohle an. Hinzu tritt der Größtanteil des von oben kommenden Geschiebes. Es panzert sich der Fluß auf seiner tiefer gelegenen Höhenlage seine Sohle selbst wiederum aus, so daß Schleppspannung und Widerstandsfähigkeit der Sohle wieder im Gleichgewicht sind und der von oben kommende Geschiebestrom ausreichend über die neue Sohle hinwegzieht.

Die Bundesanstalt für Wasserbau hatte bei der Lösung eines ähnlichen Problems - der Sohlensicherung nach dem Sturzbett eines Stauwehres - durch einen Sicherungsvorschlag auf dieser Grundlage langjährig gute Erfahrungen gemacht (Abb.1). Bei ungleichmässiger Wehrüberströmung, d.h., wenn aus Betriebsgründen eines der Wehrfelder nicht zum Abfluß herangezogen werden kann, entsteht ein besonders tiefer Kolk nach dem Sturzbett, der das Bauwerk gefährden kann.

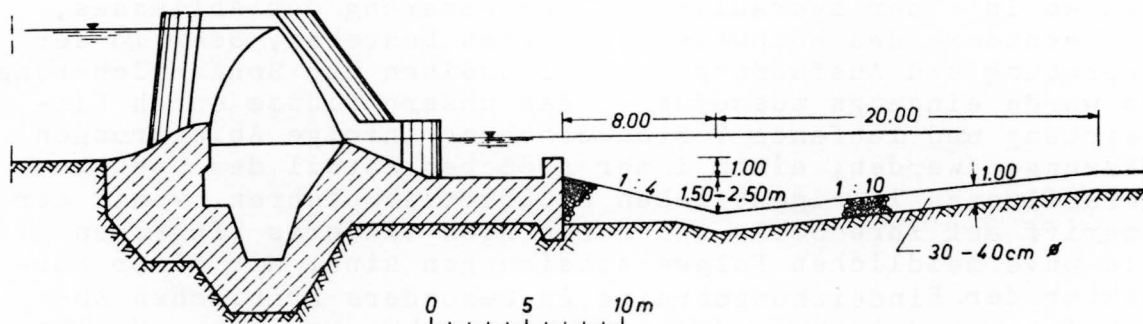


Abb. 1 Sohlensicherung nach Stauwehr

Ein dem Fluß freiwillig dargebotener wesentlich geringerer Kolk (1,5 - 2,5 m) wird durch Steinwurf von rd. 1 m Stärke und \varnothing 30 - 40 cm, der filterartig aufgebaut wird, gesichert. Seit nunmehr 10 - 12 Jahren bewährt sich diese Anordnung in sehr vielen Anwendungsfällen. Weiters hatte die Bundesanstalt für Wasserbau in 2 Fällen - Rhein bei Düsseldorf und bei Speyer - den Vorschlag zum Verbau sehr tiefer Kolke zu bearbeiten, die bereits der Schifffahrt und den Ufermauern gefährlich wurden. Sie löste das Problem durch teilweises Verfüllen der Kolke und Abdeckung durch eine 1 m starke Schicht mit größerem Korn. Auch diese Maßnahme bewährte sich bereits 8 - 10 Jahre, selbst bei sehr hohen Hochwässern. Eine beschränkte Sohlensicherung durch Steinwurf wurde auch im Oberrhein beim Bau der einzelnen Staustufen des Grossen Elsässer Kanals an den Stellen der Wiedervereinigung der abgeleiteten Rheinwassermengen mit dem Rheinfluß ausgeführt. Auch sie erfüllte gut ihren Zweck. Dr.-Ing. E. Blau, Abteilung Wasserbau der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin, berichtete in der Zeitschrift "Wasserwirtschaft - Wassertechnik" ebenfalls über Untersuchungen zur Sohlensicherung einer durch einen Durchstich verkürzten Elbestrecke mittels einer grobkörnigen Abdeckschicht.

Es nahm daher die Bundesanstalt für Wasserbau diesen Gedanken der Sohlensicherung auf und untersuchte diese Fragen in einer 48 m langen, 2,5 m breiten und 1,40 m hohen Spiegelglasrinne als Geschieberinne. Drei verschiedene Kornmischungen als Sohle mit $d_{65} = 0,75$ mm, 2,1 mm und 5,0 mm (Siebkurven s. Abb.2), die in der Rinne bereits den Beginn der Geschiebebewegung zeigten und überschritten, sollten auch bei einer Steigerung der mittleren Geschwindigkeit um 25 und 50 % durch eine Abdeckung mit größerem Korn vor einer Erosion geschützt werden. Die Abdeckschicht wurde in einer Stärke von 3 cm aufgebracht.

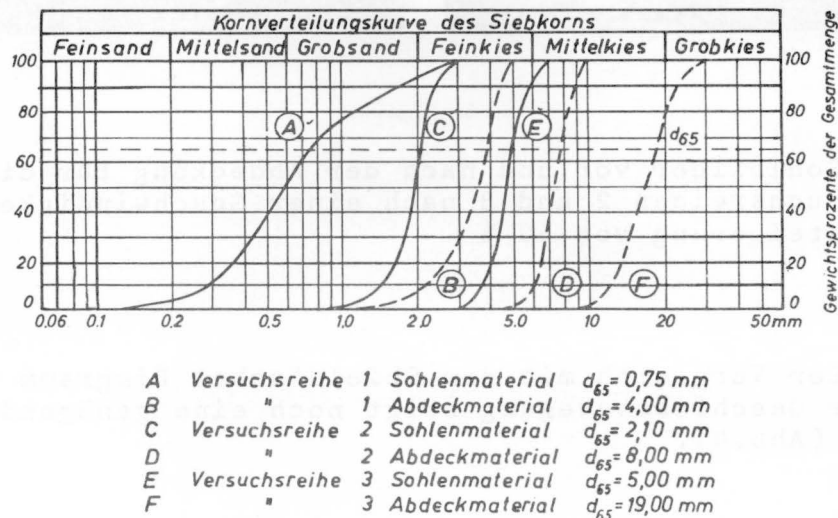


Abb. 2 Kornverteilungskurven der 3 Versuchsreihen

Die Untersuchungsergebnisse sind in das grundlegende Diagramm von Shields (Abb.4) eingetragen. Diese Modellversuche im Maßstab 1:1 können auch in einen etwas kleineren Maßstab umgerechnet werden. Nach einigen Testversuchen wurde als Abdeckmaterial ein solches vom 3,8-fachen Durchmesser (d_{65}) (s. Abb.2) des zu schützenden Materials angeordnet. Dieses Material widerstand einer 50 %igen Geschwindigkeitssteigerung absolut sicher (s.Abb.3).

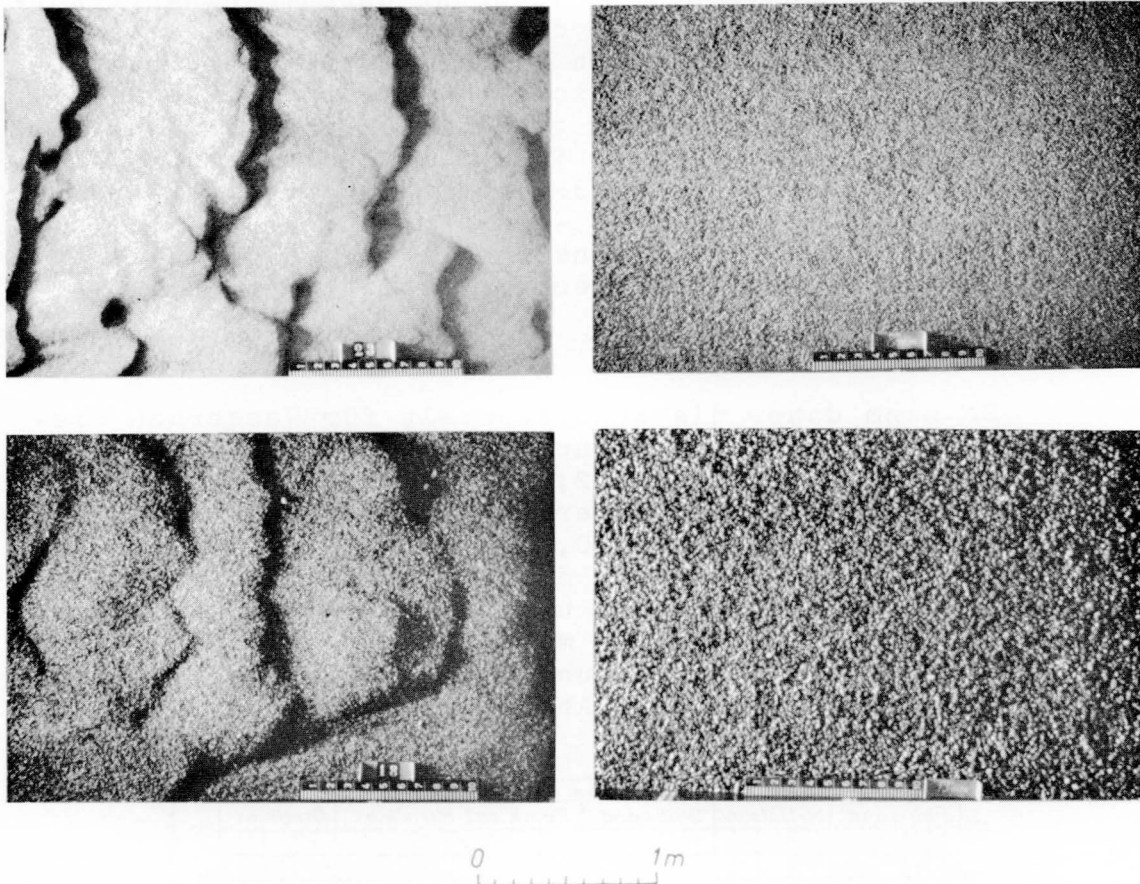
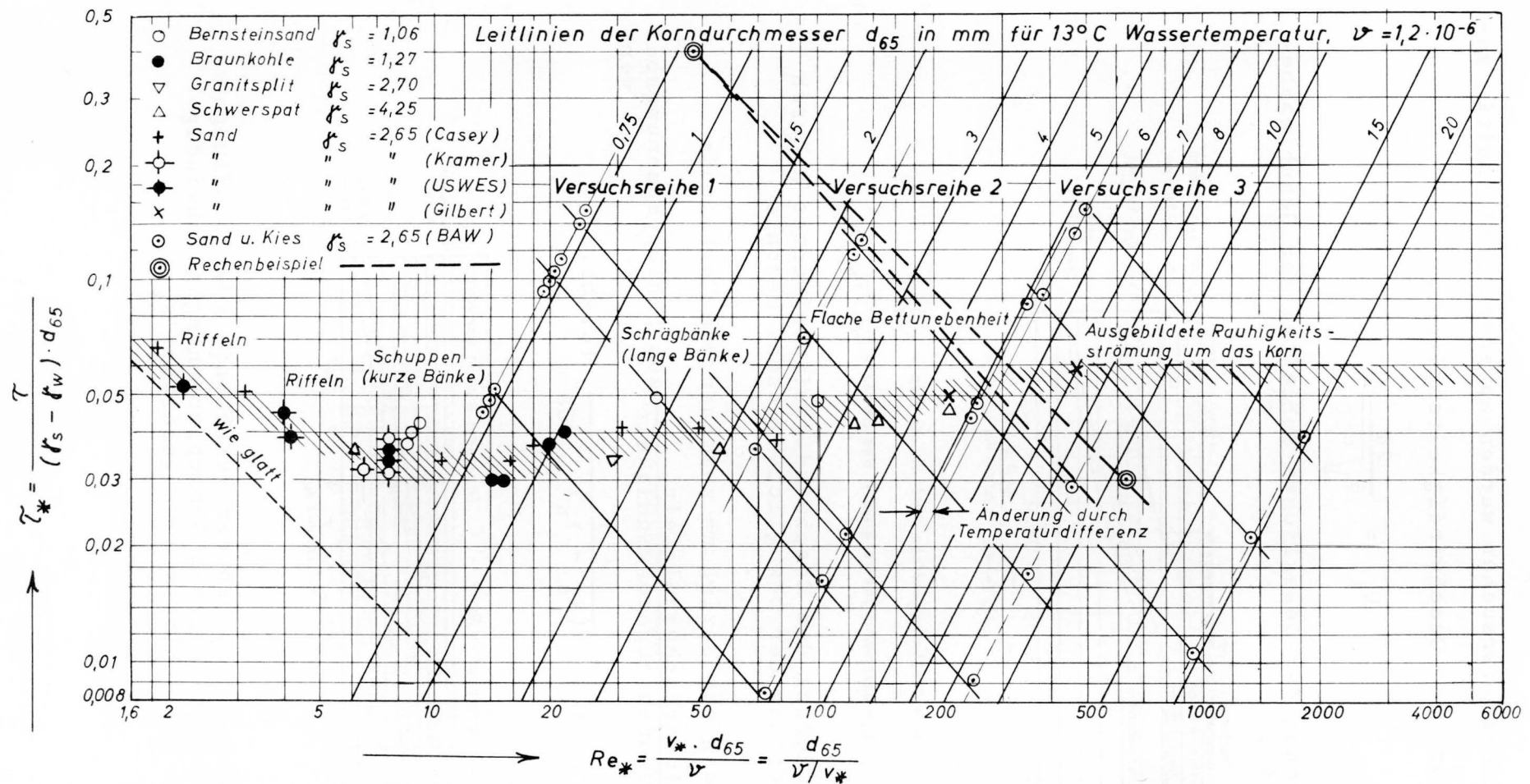


Abb. 3 Sohlbilder vor und nach der Abdeckung für die Versuchsreihen 2 und 3 nach einer Geschwindigkeitssteigerung von 50 %

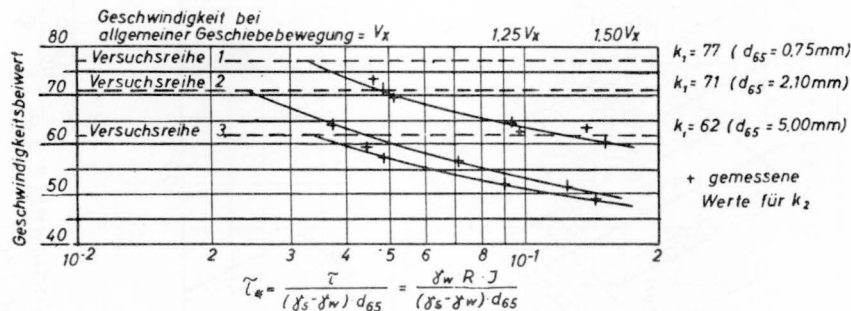
Der Vergleich mit dem Shield'schen Diagramm des Beginns der Geschiebebewegung zeigt noch eine genügende Sicherheit (Abb.4).



In diesen Versuchen wurden außerdem gleichzeitig gemessen:
Die Veränderung des Geschwindigkeitsbeiwertes

$$k_1 = \frac{26}{6\sqrt{d_{90}}}$$

durch Verformung der beweglichen Sohle bei der Geschiebebewegung (Abb.5);



$$k_1 = \text{Geschwindigkeitsbeiwert des Kornes} = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}}$$

$$k_2 = \text{Geschwindigkeitsbeiwert des Bettes} = \frac{V_m}{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}$$

Abb. 5 Veränderung des Geschwindigkeitsbeiwertes k durch Verformung der beweglichen Geschiebesohle

Die Veränderung der Beziehung zwischen dem Verhältnis

$\frac{v}{v_*}$ = $\frac{\text{Abflussgeschwindigkeit}}{\text{Schleppspannungsgeschwindigkeit}}$ zum Schleppspannungsbeiwert

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{65}} \quad (\text{s. Abb. 6})$$

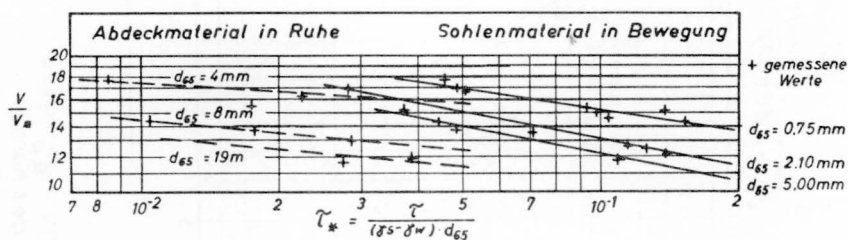


Abb. 6 Beziehung zwischen dem Verhältnis v/v_* (Abflußgeschwindigkeit durch Schleppspannungsgeschwindigkeit) zum Schleppspannungsbeiwert τ_*

Die Beziehung $\frac{\tau_*}{g_*} = \frac{\text{Schleppspannungsbeiwert}}{\text{Geschiebezahl}}$ (Abb. 7).

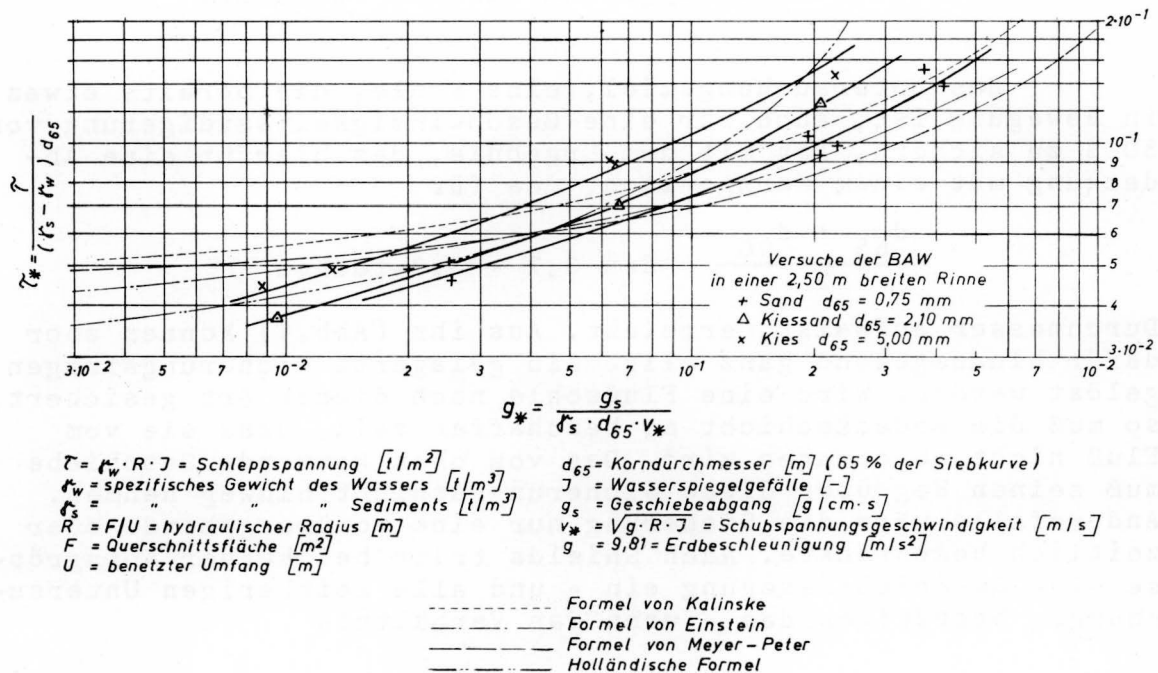


Abb. 7 Beziehung zwischen dem Schleppspannungsbeiwert

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{65}}$$

und der Geschiebezahl

$$g_* = \frac{g_s}{\gamma_s \cdot d_{65} \cdot v_*}$$

Grundsätzlich wurden alle Versuche bei gleicher durchflossener Fläche, also konstantem hydraulischem Radius $R = F/U$ ausgeführt.

Als Ergebnis zeigte sich:

dass der Formeinfluss des Bettes Berücksichtigung erfordert;
dass bei unverformter Sohle, wie dies nach dem Sohlenschutz durch Abdeckungsmaterial der Fall ist, das Verhältnis v/v_* sich mit τ_* nur gering ändert, während dies bei verformter Sohle schon stärker der Fall ist;
dass mit steigendem τ_* auch die Geschiebezahl g_* steigt, ist einleuchtend. In der gleichen Abb.7 sind die Untersuchungsergebnisse auch mit den gebräuchlichsten Geschiebeformeln von Kallinske, Einstein, Meyer-Peter und der holländischen Formel, die in dimensionsloser Form aufgetragen sind, verglichen worden. Der Unterschied erklärt sich dadurch, daß

die Formeln nicht den Einfluß der Bettverformung und der speziellen Kornverteilung wiedergeben. Im höheren Bereich ist die Berücksichtigung oder Nichtberücksichtigung des mitgeführten Schwebes ausschlaggebend für die Streuung.

Das Untersuchungsziel, eine Sohle, die bereits etwas in Bewegung ist, auch für eine Geschwindigkeitssteigerung von 50 % zu sichern, ist mit dem Ergebnis, das hierfür eine Abdeckung mit einem Korngemisch, das für

$$\frac{d_{65} + d_{90}}{2} \quad \text{den 3,7 - 3,8-fachen}$$

Durchmesser aufweist, erreicht. Aus ihr (Abb.4) können aber dafür hinausgehend ganz allgemein gelagerte Sicherungsfragen gelöst werden. Wird eine Flußsohle nach dieser Art gesichert, so muß die Abdeckschicht so beschaffen sein, dass sie vom Fluß nicht abgetragen wird. Das von oben kommende Geschiebe muß seinen Weg über diese Sicherungsschicht hinweg nehmen. Andernfalls wäre die Sicherung nur eine vorübergehende oder zeitlich beschränkte. Nach Shields tritt bei keiner Korngröße eine Geschiebebewegung ein - und alle seitherigen Untersuchungen bestätigen das - wenn das Verhältnis

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{65}} = 0,03$$

ist. Dies kann man sich mit ausreichender Sicherheit zur Vor-ausberechnung der notwendigen Korngröße der Abdeckschicht zu Nutze machen.

Als Rechnungsbeispiel für einen norddeutschen Fluß seien gegeben:

$$d_{65} = 0,8 \text{ mm}, \quad \gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3, \quad t = R = 3,5 \text{ m}, \\ J = 0,00015 \quad \gamma_w = 1,0 \text{ t/m}^3.$$

Untersuchung über vorhandene Geschiebebewegung:

$$\tau = \gamma_w \cdot R \cdot J = 1 \cdot 3,5 \cdot 0,00015 = 0,000525$$

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{65}} = \frac{0,000525}{(2,65 - 1,0) \cdot \frac{10^3}{0,8}} = 0,398$$

$$v_* = \sqrt{g \cdot R \cdot J} = \sqrt{9,81 \cdot 3,5 \cdot 0,00015} = 0,0717$$

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d_{65}}{\nu} = 0,0717 \cdot \frac{0,8}{10^{-3}} \cdot \frac{10^6}{1,20} = 47,5$$

Der entsprechende Punkt liegt bei Shields weit über dem Beginn der Geschiebepbewegung und entspricht daher einem sehr lebhaften Sandtransport.

Berechnung des d_{65} für das Abdeckmaterial :

$$\tau = 0,000525, \quad \tau_* = 0,03 = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{65}}$$

$$\text{daraus: } d_{65} = \frac{0,000525}{1,65 \cdot 0,03} \cdot 10^3 = 10,6 \text{ mm.}$$

Die Einrechnung in das Shield'sche Diagramm als Probe:

$$\tau_* = 0,03; \quad Re_* = 0,0717 \cdot \frac{10,6}{10^3} \cdot \frac{10^6}{1,20} = 632.$$

Diese Berechnung des d_{65} berücksichtigt noch nicht die Verminderung der Bettverformung durch die Abdeckung, auch noch nicht die Vergrößerung der Sohlrauhigkeit durch das Geschiebeabdeckmaterial, auch nicht eine Veränderung des Formbeiwertes des Kornes. Aus allem würde sich eine Veränderung des Energieverzehrs und damit des Wasserspiegelgefälles ergeben, und mit diesem müßte eine zweite Annäherung nachgerechnet werden. Für die Verhältnisse der oben beschriebenen Modelluntersuchungen könnte diese Annäherungskorrektur leicht ausgeführt werden durch einen Leitstrahl parallel zu den im Modell für die Kornvergrößerungen gefundenen Leitstrahlen s. Abb.4).

Das Ergebnis wäre hier eine mögliche Kornverkleinerung der Abdeckschicht auf $d_{65} = \text{rd. } 9,0 \text{ mm}$. Im Interesse der Sicherheit wird jedoch für diese Aufgabe eines Sohlenschutzes empfohlen, davon Abstand zu nehmen und den größeren Wert der Ausführung zu Grunde zu legen. Zur Erleichterung und Kontrolle sind im Shield'schen Diagramm noch die Leitlinien der Korndurchmesser für eine Zähigkeit des Wassers entsprechend 13° C eingerechnet.

Nach einem Vorschlag der Bundesanstalt für Wasserbau, der in einem Modellversuch 1:50 überprüft wurde, wird die Sohlensicherung der Nahe in Idar-Oberstein in dieser Bauweise ausgeführt werden. Infolge steiler Hanglage und dichter Verbauung dieses Ortes ist für die zukünftige Durchführung der 4-spurigen Bundesstraße kein Platz mehr vorhanden. Es muß diese Straße auf rd. 2 km Länge über dem Fluß angeordnet werden. Zu diesem Zweck wird er in einem Kasten-Profil gefaßt, und auf der Decke führt die Straße. Die Hochwassermenge des Flusses beträgt $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch die Fassung im gleichförmigen Kasten erhält der Fluß ein viel glatteres, aber auch engeres Profil. Einen Ausschnitt hieraus in einer

Flußkurve zeigt Abb. 8.

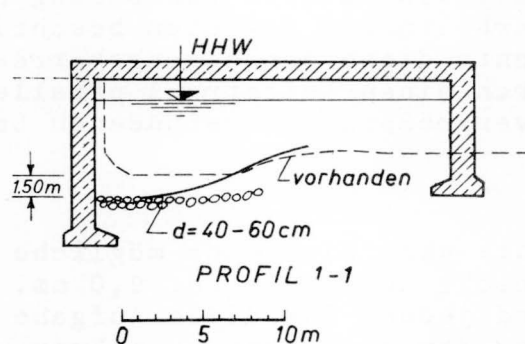
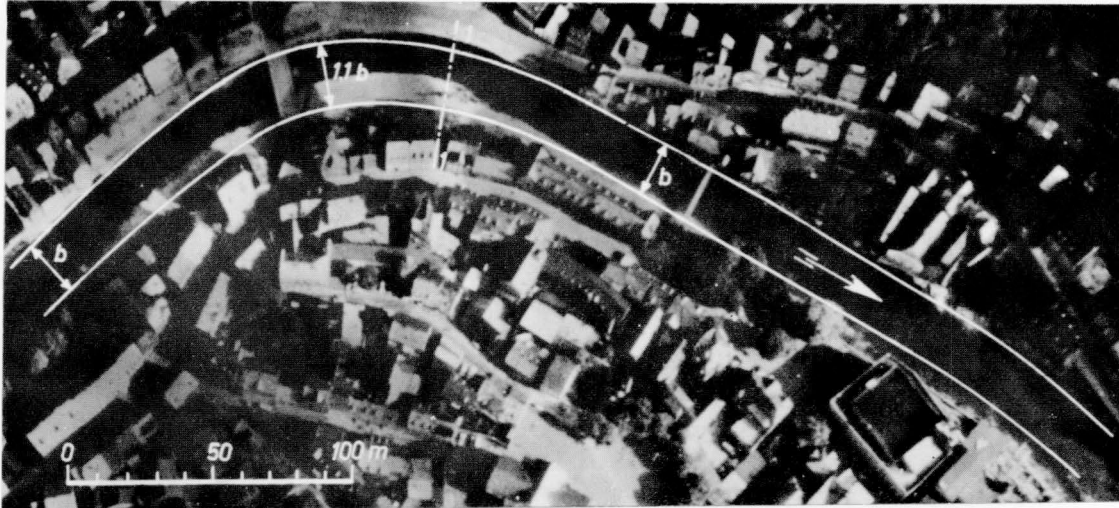


Abb. 8 Abschnitt und Querprofil des Nahe-Flusses in Idar-Oberstein

Die Fließgeschwindigkeit steigt bis 5,5 - 6 m/s an. Der Eisdurchführung und Sohlensicherung war zum Schutz des Bauwerkes größte Sorgfalt zu widmen. Vorhandenes Geschiebe $d_{65} = 7,5$ cm, Sicherung durch eine 0,75 - 1,0 m starke Steinabdeckung von $d_{65} = 50$ cm. Diese Abdeckung braucht aber nicht auf die ganze Sohlbreite angeordnet zu werden, sondern nur an den gefährdeten Außenkrümmungen, denen zusätzliche Kolk-tiefen von 1,5 - 2,0 m vorausgegeben wurden. Durch diese freiwillig angebotenen Kolke und eine Profilerweiterung um 10 - 20 % in den Krümmungen konnte einmal das notwendige Fließgefälle gesenkt und die Kolkgefahr wesentlich verringert werden. Herkömmliche Mittel der bisherigen Sohlensicherung wie Schwellen und Querspundwände zeigten sich erfolglos.

Gestehungskosten und jeweilige Vorteile:

Die technischen Vorteile dieser neuen Bauweise sind: Verlässliche Bemessung; einfache Herstellung; einfache Verbesserungsmöglichkeit; Ausführung einer elastischen Sohle, die Veränderungen nachgeben und daher nicht unterspült werden kann; Erhöhung der Rauigkeit der Sohle und damit bereits Energieverzehr, wenn auch das darüber hinwegfließende Geschiebe die Sohle wiederum etwas glättet; leichte Ausführung und Sicherung vorgegebener Kolke. Für die Gestehungskosten werden Erfahrungen abgewartet werden müssen.

